

高速公路特殊位置节能照明控制系统设计

——阳光和风能

唐董¹, 秦淑媛², 马雯雯¹, 陶晶晶¹, 王盈¹

¹滁州学院计算机与信息工程学院, 安徽 滁州

²滁州学院经济与管理学院, 安徽 滁州

收稿日期: 2022年12月13日; 录用日期: 2023年1月8日; 发布日期: 2023年1月18日

摘要

高速公路中隧道、立交等特殊位置需要照明。伴随着我国高速公路建设的快速发展, 这些特殊位置的数量和里程数也在不断的增加, 产生了巨大的照明用电需求和费用, 给高速公路运营带来了极大的困难。如何结合高速公路特征, 设计自服务照明控制系统, 提升高速公路照明用电自给自足能力是关键。针对这一问题, 设计了一种高速公路特殊位置节能照明控制系统, 利用高速行驶车辆带来的风能和改进的垂直轴风力涡轮发电装置, 实现了狭小空间约束下不受天气约束的风力发电, 提升高速公路照明自给自足能力。系统与普通照明供电系统结合, 并根据应用场景, 辅以光伏发电, 既进一步提升了高速公路自服务功能, 又保障了照明系统各种条件下的不间断工作。设计的系统具有实现简单、成本低、占用空间小和节能效果显著的特点。以高速公路隧道为例, 本项目预计节约隧道照明电费35.2亿元/年。本项目社会效益良好, 极具推广价值。

关键词

高速公路, 特殊位置, 风力发电, 绿色能源

Highway Special Position Energy-Saving Lighting Control System Design

—The Sun and Wind

Dong Tang¹, Shuyuan Qin², Wenwen Ma¹, Jingjing Tao¹, Ying Wang¹

¹School of Computer and Information Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui

²School of Economics and Management, Chuzhou University, Chuzhou Anhui

Received: Dec. 13th, 2022; accepted: Jan. 8th, 2023; published: Jan. 18th, 2023

文章引用: 唐董, 秦淑媛, 马雯雯, 陶晶晶, 王盈. 高速公路特殊位置节能照明控制系统设计[J]. 传感器技术与应用, 2023, 11(1): 71-82. DOI: 10.12677/jsta.2023.111008

Abstract

Highway tunnels, interchanges and other special locations need lighting. With the rapid development of highway construction, the number and mileage of these special locations are also increasing, resulting in the huge electric demand and cost of lighting, which brings great difficulties to highway operation. How to design the self-serving lighting control system based on the characteristics of the highway and improve the self-sufficiency of the highway lighting power supply is the key. To solve this problem, an energy-saving lighting control system for special locations of expressways is designed. By using the wind energy brought by high-speed vehicles and the improved vertical axis wind turbine power generation device, wind power generation free from weather constraints in narrow space is realized, and the self-sufficiency of expressways lighting is improved. The system is combined with the general lighting power supply system, supplemented by photovoltaic power generation according to the application scenarios, which not only further improves the self-serving function of the highway, but also ensures the uninterrupted work of the lighting system under various conditions. The designed system has the characteristics of simple implementation, low cost, small occupancy space and remarkable energy-saving effect. Taking the expressway tunnel as an example, the project is estimated to save 3.52 billion yuan per year in tunnel lighting electricity charges. This project has good social benefits and great promotion value.

Keywords

Highways, Special Locations, Wind Power, Green Energy

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国高速公路的建设力度加大,高速公路中的隧道、立交等需要照明的特殊位置数量和里程数也在不断增加。据初步统计,截至2020年底,我国已建成高速公路隧道21,316座,总长度21999.3 km,其中长隧道5541座,长度9633.2 km;特长隧道1394座,长度6235.5 km [1]。

随着这些特殊位置的不断增加,其照明用电需求和费用也在不断的攀升。有统计表明,高速公路照明运营平均费用高达20万~30万元/公里/年[2]。2016年,我国公路隧道的照明费用高达56.2亿元,隧道照明能耗占高速公路运营总能耗的85% [3]。通过对高速公路中隧道、立交等特殊位置的实际观察与测试,我们发现:1) 高速公路中快速行驶车辆能带来源源不断的风能,可采用风力发电;但这些位置空间狭小,不利于普通水平轴风力发电设备安装;2) 所考虑的风力发电无法保障高速公路中特殊位置照明的不间断工作。

基于上述观察与测试,从节能环保的角度出发,利用高速行驶车辆带来的风能并设计垂直轴风力涡轮发电装置,实现狭小空间中的风力发电,提升高速公路照明用电的自服务能力;同时,我们将风力发电与普通照明供电结合,并根据具体应用场景(如隧道口、立交等),辅以光伏发电,在保障高速公路特殊位置照明不间断工作的同时,进一步提升了其自服务功能。

2. 设计方案

2.1. 系统设计

本系统由两个部分组成，分别为发电与储能部分和照明控制部分，如图 1 所示。

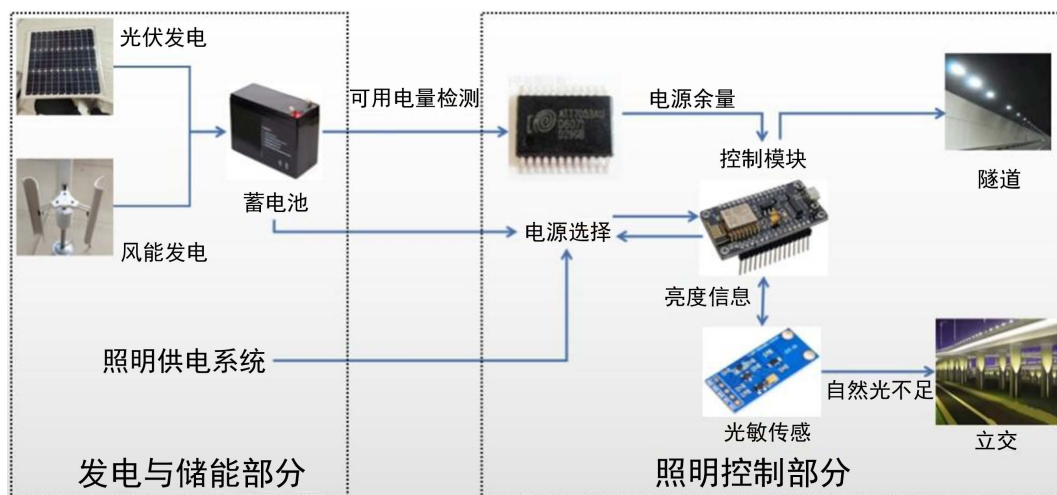


Figure 1. System composition structure diagram

图 1. 系统组成结构图

发电与储能中的发电部分由风力发电和光伏发电两个模块组成。风力发电模块利用高速行驶车辆带来的风能和垂直轴风力涡轮发电装置实现风能到电能的转换；光伏发电模块收集太阳能并将其转换为电能，根据应用场景需要，该模块为可选模块。储能部分将上述的转换电能储存备用。

照明控制部分根据蓄电池的储能情况，选择照明用电来源，保障照明系统的正常供电；同时，利用光敏传感器判断自然光的强度，从而控制照明路灯的开闭。

2.2. 关键技术

发电与储能部分的关键技术主要为：根据高速公路隧道、立交的可用空间，选择并设计风力发电叶片组织结构，实现狭小空间下的风力发电。

照明控制部分以单片机为核心，相应的关键技术主要包括：1) 判断蓄电池的储能情况，并依据判断结果选择照明用电来源；2) 检测自然光强度并将其与高速公路照明光照需求标准进行比较，依据比较结果控制照明路灯的开闭。

3. 方案实施及其效果

3.1. 风力涡轮发电装置选择与设计

目前，风力发电装置分为水平轴和垂直轴两种，分别如图 2 和图 3 所示。

水平轴风力发电装置的发电效率受其面对的风向影响较大，有研究表明，若水平轴风力发电的扇叶偏离风向 40° ，其能量利用率系数将下降 50% [4]；同时，为了保持高效的发电效率，其扇叶长度一般较大，难以适用于高速公路隧道等特殊位置。因此，我们在本系统中选择垂直轴风力发电装置。

在具体使用过程中，考虑到高速公路中车流方向及其产生的尾流风向固定，我们对图 4 所示的传统垂直轴风力发电扇叶结构进行了改进，将其由平面式结构改进为后弯流线型凹槽式结构，从而进一步增

加汽车尾流利用效率和系统发电效率。传统的垂直轴风力发电扇叶和优化后的扇叶分别如图 4 和图 5 所示，3D 打印的优化扇叶如图 6 所示。



Figure 2. Horizontal axis wind power generation device
图 2. 水平轴风力发电装置



Figure 3. Vertical axis wind power plant
图 3. 垂直轴风力发电装置

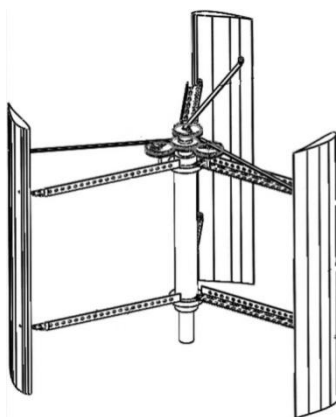


Figure 4. Traditional vertical axis wind turbine fan blade
图 4. 传统的垂直轴风力发电扇叶

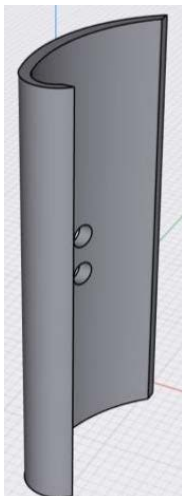


Figure 5. Optimized fan blade diagram under 3D modeling
图 5. 3D 建模下优化后的扇叶图



Figure 6. Optimized fan blade of 3D printing
图 6. 3D 打印的优化扇叶

3.2. 蓄电池储能情况检测模块设计

系统照明控制部分根据蓄电池的储能情况，选择照明用电来源，保障照明系统的不间断供电。本项目利用专业的系统级估算芯片 DS2780 检测蓄电池的储能情况，通过对 DS2780 本身的内部参数设置，利用其自带的高精度、高稳定性的内部时钟，测量蓄电池的电压、温度和电流，同时可以将计算得到的电池当前剩余电量显示在 SSD1306 OLED 显示屏上。当蓄电池剩余能量充足时，选择蓄电池储能为照明系统供电，否则选择普通照明供电系统为照明系统供电，从而保障照明系统的不间断供电。

DS2780 采用 1-Wire 总线接口与项目所用的单片机相连，减少了布线难度的同时也削弱了电磁干扰的影响。DS2780 搭建的电流采样电路和系统 OLED 屏显示的电量百分比分别如图 7 和图 8 所示。

3.3. 光敏传感器选择与照明开闭标准选择

光敏传感器与光伏发电模块结合使用，为系统可选模块，主要应用于立交等具有自然光照明的场所。项目采用 GY-30 感光模块实现自然光强度信息采集，其实物图如图 9 所示。

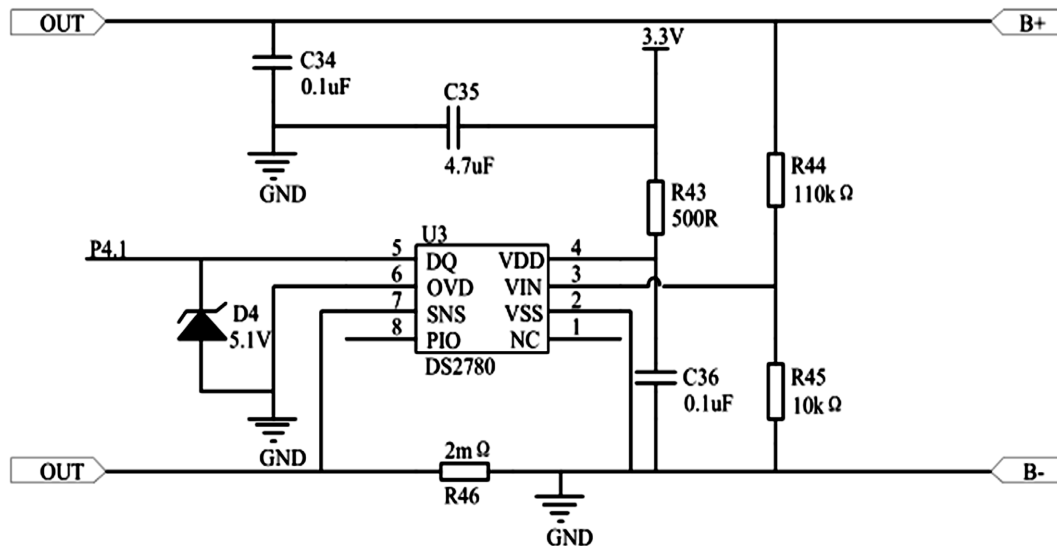


Figure 7. Sampling circuit diagram of DS2780

图 7. DS2780 采样电路图

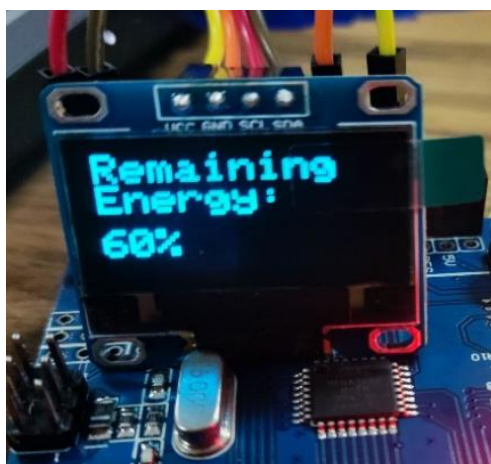


Figure 8. OLED display showing the percentage of battery charge

图 8. OLED 屏显示电量百分比



Figure 9. GY-30 photosensitive module

图 9. GY-30 感光模块

项目根据《隧道照明用 LED 灯具性能要求[GB/T 32481-2016]》[5]确立照明开闭的标准，具体的道路照明路面亮度标准如表 1 所示。

Table 1. Standard road brightness values for road lighting***表 1.** 道路照明路面亮度标准值*

道路类别	Lav 维持值 cd/m^2
快速路 主干路	$\geq 1.5/2.0$
次干路	$\geq 0.75/1.0$
支路	$\geq 0.5/0.75$

*注：表中各项数值仅适用于干燥路面；表中对每一级道路的平均亮度给出了两档标准值，“/”的左侧为低档值，右侧为高档值，中小城市道路以及交通控制系统和道路分隔设施完善的道路可选择低档值，反之宜选择高档值；Lav 为道路表面的平均初始亮度。

当感光模块采集的道路表面平均亮度低于最低档时，既 Lav 在主干路上低于 1.5，在次干路上低于 0.75，在支路上低于 0.5，此时照明控制模块通过继电器打开路灯，否则将路灯关闭，减少非必要照明和资源浪费，从而实现对照明路灯的智能控制。

4. 作品实物模型

4.1. 系统各组成部分模型

本系统主要包括风力发电模块、光伏发电模块、整流器模块、恒压恒流模块、蓄电池模块和用电管理模块，各模块的功能和实物分别介绍如下：

- 1) 风力发电与光伏发电模块用于将汽车尾流产生的风能和太阳能转换为电能，如图 10 所示。
- 2) 整流模块用于确定风力发电与光伏发电模块输出电流的正负极，如图 11 所示。



Figure 10. Wind power generation and photovoltaic power generation module
图 10. 风力发电与光伏发电模块



Figure 11. Rectifier module
图 11. 整流模块

- 3) 恒流恒压模块用于降低各种干扰因素造成的电流不稳定对蓄电池中元器件的损坏，使电流趋于平缓，如图 12 所示。
- 4) 蓄电池模块用于储存风力发电与光伏发电转换的电能，如图 13 所示。



Figure 12. Constant voltage cross flow module
图 12. 恒压横流模块



Figure 13. Battery module
图 13. 蓄电池模块

此外，系统还接入了常规民用电，当遇到突发情况，导致系统不可用时，仍然能够保证常规的照明。

4.2. 系统整体模型

系统整体模型如图 14 所示。



Figure 14. Overall system model diagram
图 14. 系统整体模型图

5. 仿真测试与发电分析

5.1. 相关理论

在 MATLAB/SIMULINK 中建立整流电路的仿真模型, 可以选用 SIMPOWER SYSTEMS 中的全桥模块, 设定桥臂数为 3, 功率电子器件为二极管, 就可以得到一个三相不可控整流桥, 如图 15 所示。

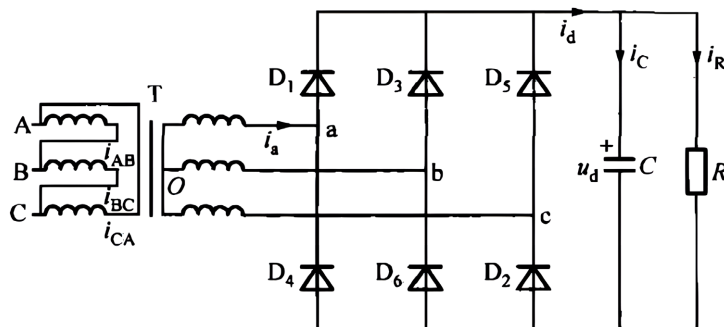


Figure 15. Simulation model of three-phase uncontrolled rectifier bridge
图 15. 三相不可控整流桥仿真模型

三相不可控整流电路的工作原理为: 当某一对二极管导通时, 输出的直流电压等于交流侧线电压中最大的一个, 该线电压既向电容供电, 又向负载供电。当没有二极管导通时, 由电容向负载供电, 电容电压 U_d 按指数规律下降。

由整流电路中电压下降速度相等的原则, 可以确定交流侧向直流侧充电电流连续与断续的临界条件:

$$WRC = \sqrt{3} \quad (1-1)$$

式中: C 为滤波电容值, R 为负载阻值(理想化条件)。

当 $WRC = \sqrt{3}$ 时, 电流 i_d 是连续的; 当 $WRC > \sqrt{3}$ 时, 电流 i_d 是断续的。对于某一个特定的整流电路而言, 通常发生变化是负载的大小。通过式(1-1)可以看出, 当电路负载较大时充电电流 i_d 是连续的, 负载较小时电流是断续的, 分界点为 $R = \sqrt{3}/(WC)$ 。

当整流电路空载时, 输出电压的平均值最大, 此时 $U_d = \sqrt{6}U_L = 2.45U_L$, 其中 U_L 为输入的线电压。当负载增大直至电流 i_d 进入连续状态时, 输出电压波形为线电压的包络线, 平均值为 $U_d = 2.34U_L$ 且不再发生变化。可见输出电压的平均值 U_d 在 $2.34U_L$ 与 $2.45U_L$ 范围之内。

输出电流的平均值 $I_R = U_d/R$, 由于电容支路上的平均电流为 0, 所以有 $I_d = I_R$ 。整流二极管上电流的平均值为 I_d 的 $1/3$, $I_{VD} = I_d/3 = I_R/3$ 。每个整流二极管所承受的最大反向电压为线电压的峰值, 即 $\sqrt{6}U_L$ 。

由上面的分析可知, 由于风力发电机的输入电压为 20 V, 能够得到的最大输出电压为 49 V, 由上面的结论可以知道输出电压的均值为 46.8 V 到 49 V。

由于风力发电受到大自然中风速变化的影响, 发电机输出的电能具有间歇性和不确定性, 风力发电系统普遍采用铅蓄电池组作为储能装置。蓄电池的主要作用有: 能够使风力发电机运行在一个比较稳定的输出水平, 起到稳定系统运行状况的作用; 在无风或低风速条件下, 发电机不能正常运行发电时释放能量, 起到过渡的作用; 使得分布式发电系统能够作为可调度机组单元运行, 实现并网的运行。

与理想等效模型相比, 蓄电池的简单等效模型能够反映实际蓄电池的基本特性, 且不失一般性, 因此可采用简单等效模型对蓄电池进行仿真。在 MATLAB 中建立蓄电池仿真模块, 电池开路电压等于其

输出端的电压值,这里为与硬件试验系统保持一致,电压值取两块铅酸蓄电池串联之和,即 $U_{cell} = 24 \text{ V}$ 。仿真模块如图 16 所示:

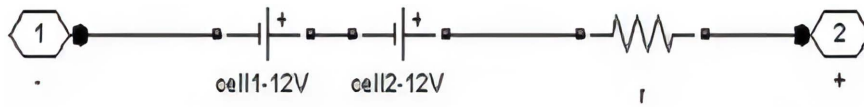


Figure 16. Battery simulation model

图 16. 蓄电池仿真模型

综上所述,通过风能发电再加上一个光能发电作为辅助,其中发电机启动风速 4 m/s,扇片长(250 mm)太阳能板(250 W 单晶发电板),单个风机能产生 0.09 度/h,风机能工作时长 16 小时/天,单个太阳能板产生 0.25 度/h,一天按大约 8 个小时工作时间算,因此光能加上风能一天大约能产生 3.44 度。

通过上面永磁风力发电机结构及数学模型和发电机整流输出和蓄电池的一些公式和数据得到表 2 所示。

Table 2. Data analysis table

表 2. 数据分析表

转速/(m/s)	风能系数	功率/(w)	电压/(V)
8	0.15	2.7	5.2
10	0.2	10.8	10.4
12	0.225	18.6	12

5.2. 仿真分析

为了验证上述最大风能跟踪策略的正确性和有效性,利用 Matlab/Simulink 仿真平台,采用 PI 控制器和对线性滑模控制器直驱式永磁同步发电系统分别进行仿真分析。垂直轴永磁同步风力发电系统的风力机,永磁同步发电机及传动系统主要仿真参数见表 3。

Table 3. Parameters of vertical axis permanent magnet synchronous wind power generation system

表 3. 垂直轴永磁同步风力发电系统参数

参数	取值
空气密度/(kg/m^3)	1.225
风力机转子半径/m	0.381
风力机高度/m	1.22
等效转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.006
转动粘滞系数/($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)	0.044
定子电阻/ Ω	0.78
直轴电感/mH	8.5
交轴电感/mH	8.5
转子永磁体磁链/Wb	0.07326
电机极对数	8

直轴直驱永磁同步发电系统仿真双闭环 PI 参数表 4。

Table 4. PI controller parameters
表 4. PI 控制器参数

PI 参数	转速	q 轴电流	d 轴电流
K_p	0.09	10	10
K_i	3	556	556

6. 创新点与应用效果

6.1. 项目创新点

针对高速公路特殊位置照明能耗巨大且自服务功能低的问题，采用风力发电、光伏发电和普通照明供电结合的方式，设计了一种高速公路特殊位置节能照明控制系统，提高了风能、太阳能等绿色能源在照明用电中的比例和照明系统的自服务能力，降低了碳排放；同时，设计的系统在实际应用时只需有汽车行驶，就能实现风能到电能转换，不受自然风力的约束。项目的创新点主要包括：

- 1) 采用能够在狭小空间中工作的垂直轴风力涡轮发电装置将汽车尾流所产生的风能转换为电能，提升高速公路照明系统的自服务能力；
- 2) 将传统垂直轴风力发电扇叶由平面式结构改进为后弯流线型凹槽式结构，提升汽车尾流利用效率和系统发电效率；
- 3) 根据自然光强度与照明需求光强度比较结果，自适应控制照明路灯的开闭，降低非必要照明能耗；
- 4) 将汽车尾流所产生的风力发电、光伏发电和普通照明用电结合，保障高速公路特殊位置照明系统的不断工作。

6.2. 预计应用效果分析

受疫情防控影响，无法到高速公路实际场景中进行相应的实验数据采集与分析，因此采用了数据类推与模拟的方法进行测试。另外，本系统中的光伏发电模块为可选项，仅用于立交等有太阳光照射的道路场景。因此，在预计应用效果分析中，我们仅以垂直轴风力发电进行分析。

已有研究表明一辆以 120 km/小时行驶的大型车辆引起的风速可达 12 m/s [6]，而我国高速公路中的平均车速在 70 km/小时 [7]，则产生的风速可达 7 m/s。我们利用单片机产生的 PWM 波控制普通电风扇产生 7m/s 的风，从而吹动垂直轴风力发电机并将产生的电能存储到蓄电池中。通过观察工作一段时间后蓄电池储能变化情况，计算得出单个垂直轴风力发电机的发电效率。通过上述方法，我们设计的单个风力发电机每小时可产生 0.09 度电。

以单个风力发电机能产生 0.09 度/小时，风力发电机能工作时长 16 小时/天，计算得到一天的发电量大约 1.44 度；长隧道内节能 LED 灯的功率一般为 150 W [8]，则其工作一天所需电量大约 3.6 度。

以秦岭终南山隧道(18.02 km) [9]为例，每隔 10 m 安装一个 LED 灯，每隔 5m 安装一个风力发电机，则需要安装 LED 灯和风力发电机分别为 1802 个和 3604 个。用上述的数据计算得到，长隧道内所有的风力发电机一天产生 5189.76 度，所有 LED 灯一天照明所需电量 6487.2 度；则风力发电机产生的电能与 LED 灯照明所需电能的比例为：

$$5189.76/6487.2 = 80\%。$$

有研究表明高速公路照明运营平均费用高达 20 万~30 万元/公里/年 [2]，我们取最小值 20 万元/公里/

年,则可节省 $20 \text{ 元/公里/年} \times 80\% = 16 \text{ 万元/公里/年}$ 。而全国高速公路隧道总长度为 21999.3 km [1],可节省 $16 \text{ 万元/公里/年} \times 21999.3 \text{ km} = 351988.8 \text{ 万元/年}$,约为 35.2 亿元。

基金项目

滁州学院大学生省级创新训练项目“集阳聚风——高速公路关键位置节能照明控制系统设计”(2022CXXL070)。

参考文献

- [1] 交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京: 交通运输部, 2021.
- [2] 朱磊. 特长公路隧道灯具优化布置与智能调光节能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [3] 秦莉. 公路隧道照明系统智能控制的关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [4] 田四明, 王伟, 杨昌宇, 等. 中国铁路隧道 40 年发展与展望[J]. 隧道建设, 2021, 41(11): 1903-1930.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB/T32481-2016. 隧道照明用 LED 灯具性能要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [6] 李莉. 特定运动状态下车辆瞬态空气动力学特性的研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2010.
- [7] 省界收费站取消已过半年国内高速平均速度提高多少? 官方给出答案[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1676177411134898878&wfr=spider&for=pc>, 2022-04-16.
- [8] 李晓寒. 高速公路隧道照明节能控制研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- [9] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.